

Лекция 5 Усилители

Усилителями называют устройства, осуществляющие однозначное и непрерывное преобразование электрических сигналов малой величины в сигналы значительно большие по величине. Усилители находят применение в самых различных областях науки и техники, например, при измерениях неэлектрических величин, контроле и автоматизации производственных процессов, в системах управления, в радиотехнических устройствах и т. п.

В качестве усилительного элемента в современных усилительных устройствах используются преимущественно биполярные и полевые транзисторы. Все большее применение в настоящее время находят микросхемы, содержащие как усилительные элементы, так и резисторы. Они осуществляют не только усиление, но и другие преобразования входных сигналов, например, выполняют математические преобразования сигналов (суммирование, интегрирование, логарифмирование). Это так называемые операционные усилители.

По количеству используемых усилительных элементов различают:

1. Однокаскадные усилители, имеющие один усилительный элемент;
2. Многокаскадные усилители. Как правило, схема усилителя выполняется из нескольких каскадов.

По роду усиливаемой величины усилительные каскады классифицируют на 3 типа:

1. Усилители напряжения;
2. Усилители тока;
3. Усилители мощности.

Эта классификация удобна на практике, хотя и условна, поскольку во всех трех типах усилителей имеет место усиление мощности сигнала.

Усилители мощности обычно являются оконечными каскадами, а усилители напряжения - каскадами предварительного усиления. Нагрузкой каждого каскада предварительного усиления является входное сопротивление следующего каскада, нагрузкой оконечного каскада может быть обмотка электромагнитного реле, обмотка управления электродвигателя, отклоняющая система электроннолучевой трубки, обмотка громкоговорителя и т.п.

Следует отметить, что может иметь место параллельное включение усилительных элементов в пределах одного каскада с целью увеличения мощности (например: в двухтактном усилителе мощности).

По типу элементов, объединяющих усилительные каскады друг с другом, в основном различают:

1. Резистивно-емкостные связи;
2. Трансформаторные связи.

В зависимости от диапазона частот, в котором используются усилители, их разделяют на:

1. Усилители постоянного тока (УПТ) – для усиления медленно изменяющихся сигналов;
2. Усилители низкой частоты (УНЧ) – для усиления сигналов до сотен кГц;

3. Высокочастотные усилители (УВЧ) – для усиления сигналов до сотен МГц.

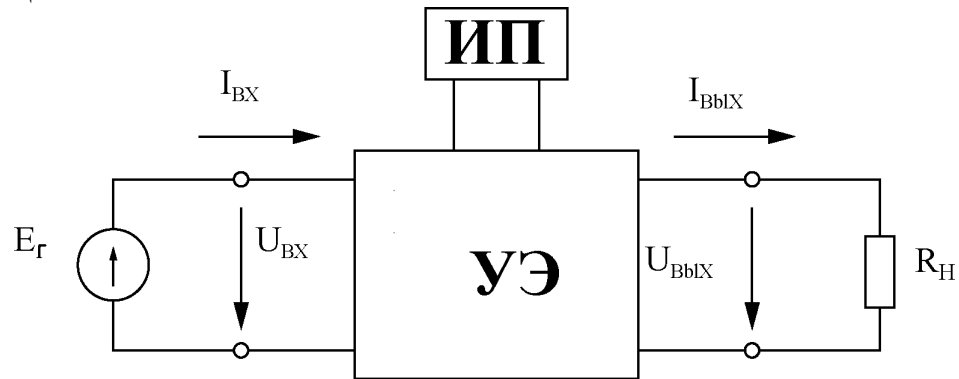


Рис. 5.1. Блок-схема усилителя.

А также различают широкополосные и избирательные усилители. Любой усилитель имеет структуру (рис. 5.1.): входную и выходную цепи, к которым подключается источник сигнала E_{Γ} и нагрузочное устройство R_H , источник питания – ИП и усилительный элемент – УЭ (транзистор, микросхема). Процесс усиления связан с **преобразованием** энергии источника питания в энергию выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ усилителя.

Параметры и характеристики усилителей

Основным параметром усилительного устройства является его коэффициент усиления.

В соответствии с разделением усилителей на усилители напряжения, тока и мощности различают:

1. Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}},$$

где $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение усилителя; $U_{\text{вх}}$ – напряжение сигнала или входное напряжение усилителя.

2. Коэффициент усиления по току:

$$K_i = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}},$$

где $I_{\text{вых}}$ – ток в нагрузке; $I_{\text{вх}}$ – ток на входе усилителя.

3. Коэффициент усиления по мощности:

$$K_p = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}},$$

где $P_{\text{вых}}$ – активная мощность, выделяемая в нагрузке, $P_{\text{вх}}$ – мощность, потребляемая входной цепью усилителя.

Эти коэффициенты связывает соотношение:

$$K_u \bullet K_i = K_p.$$

Выходной мощностью $P_{\text{вых}}$ усилителя или его номинальной мощностью называют полезную мощность, которая выделяется на нагрузке R_n при заданном уровне нелинейных искажений:

$$P_{\text{вых}} = U_{\text{вых max}}^2 / R_n,$$

где $U_{\text{вых max}}$ - максимально допустимое действующее значение выходного напряжения.

Коэффициент полезного действия усилителя позволяет оценить его экономичность, он равен:

$$\eta = P_{\text{вых}} / P_{\text{потр}} \bullet 100\%,$$

где $P_{\text{потр}}$ – мощность, потребляемая от источников питания усилителя.

Входное сопротивление усилителя:

$$R_{\text{вх}} = dU_{\text{вх}} / dI_{\text{вх}},$$

т.е. сопротивление со стороны входных зажимов усилителя.

Со стороны выходных зажимов усилитель можно представить источником напряжения с ЭДС E , пропорциональной $U_{\text{вх}}$, и **выходным сопротивлением** $R_{\text{вых}}$, т.е. $R_{\text{вых}}$ – это сопротивление усилителя относительно выходных зажимов.

Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) усилителя называется зависимость коэффициента усиления (его модуля) от частоты.

В реальных усилителях АЧХ имеет вид (рис. 5.2):

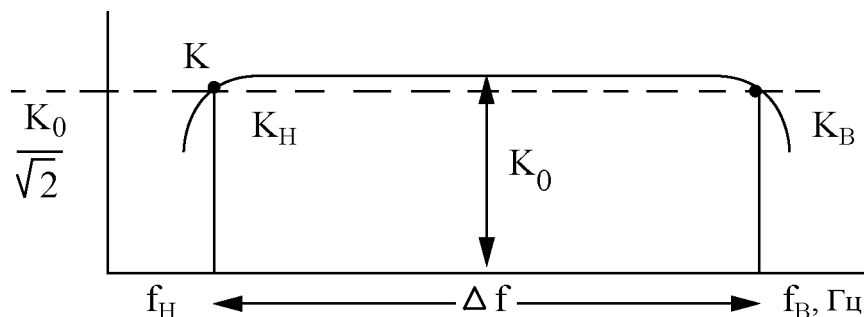


Рис. 5.2. Амплитудно-частотная характеристика усилителя

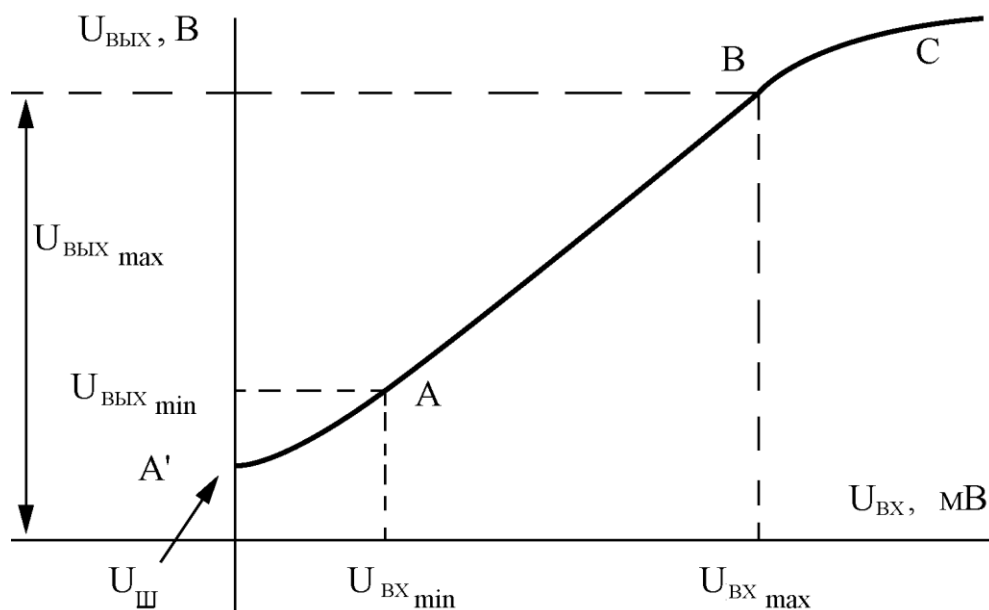


Рис. 5.3. Амплитудная характеристика усилителя

Полоса частот Δf , в которой K_u изменяется в допустимых пределах, ограничена высшей и низшей граничными частотами f_v и f_n , т.е. $\Delta f = f_v - f_n$, называется **полосой пропускания** усилителя.

Мерой частотных искажений, определяющих граничные частоты усилителя, служит **коэффициент частотных искажений M** , равный отношению коэффициента усиления K_0 на средних частотах к коэффициенту усиления на граничной частоте K_n или K_v , т.е.

$$M_n = K_0 / K_n \quad \text{или} \quad M_v = K_0 / K_v$$

Обычно допустимые значения коэффициентов частотных искажений не превышают величину $\sqrt{2}$.

У большинства усилителей полоса пропускания частот составляет $\Delta f = (10^2 - 10^7)$ Гц поэтому они называются широкополосными.

Амплитудной характеристикой называют зависимость выходного напряжения усилителя $U_{\text{ВЫХ}}$ от величины входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ на средних частотах.

Амплитудная характеристика усилителя (рис. 5.3) имеет несколько участков: участок AA' , обусловленный внутренними шумами усилителями и помехами; прямолинейный участок $A-B$ – рабочий участок характеристики; и участок BC , обусловленный нелинейностью усилительных элементов при большом уровне сигнала.

Минимальный уровень выходного полезного сигнала $U_{\text{ВЫХ min}}$ должен в 2-3 раза превышать уровень шума усилителя $U_{\text{Ш}}$. На рабочем участке характеристики в силу его линейности коэффициент усиления $K_0 = \text{const}$ и выходное напряжение усилителя пропорционально входному (линейный режим работы). Точка B характеристики соответствует предельно

допустимому значению выходного напряжения $U_{BX_{max}}$. При дальнейшем увеличении амплитуды входного напряжения появляются значительные искажения формы выходного сигнала, так называемые **нелинейные искажения** усилителя.

5. Принцип работы усилителя

Усилительные устройства предназначены для усиления переменных сигналов и, в частности, синусоидальных сигналов, подаваемых на вход усилителя.

Наличие одного только усилительного элемента (биполярного или полевого транзистора) без других элементов (резисторов, конденсаторов и т.д.) не может обеспечить усиление переменного сигнала. Связано это с тем обстоятельством, что усилительный элемент требует определенной полярности на всех электродах, т.е. он может преобразовывать сигналы только пульсирующие (одной полярности). Следовательно, усилительное устройство должно содержать элементы, позволяющие преобразовывать переменные сигналы на входе усилительного устройства в пульсирующие сигналы на электродах усилительного элемента. Такими элементами являются источник питания (с постоянной ЭДС E_K и резисторы R_K и R_B), задающие определенные постоянные потенциалы на электродах усилительного элемента, т.е. **режим работы по постоянному току**, так называемую **рабочую точку на ВАХ транзистора**. Переменный электрический сигнал, подаваемый на вход, складывается с постоянной составляющей от источника питания и вызывает изменение потенциалов необходимой полярности на всех электродах усилительного элемента. В результате на выходе также будет получен усиленный переменный сигнал.

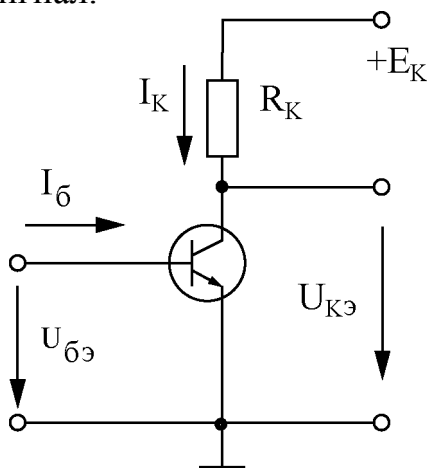


Рис. 5.4. Схема включения биполярного транзистора

Для обеспечения динамического режима работы усилительного элемента последовательно с ним в цепь постоянного источника включается нагрузочный резистор R_K . При этом в соответствии со 2-м законом Кирхгофа изменение напряжения на этом резисторе будет иметь такой же характер как

и на усилительном элементе, но только противоположной полярности. Включение источника питания E_K и нагрузочного резистора R_K к биполярному транзистору показано на рис. 5.4.

Значения постоянных напряжений $U_{KЭ0}$ и $U_{БЭ0}$ и тока $I_{Б0}$ транзистора в режиме покоя определяются с помощью, приведенных на рис.5.5, статических переходных характеристик.

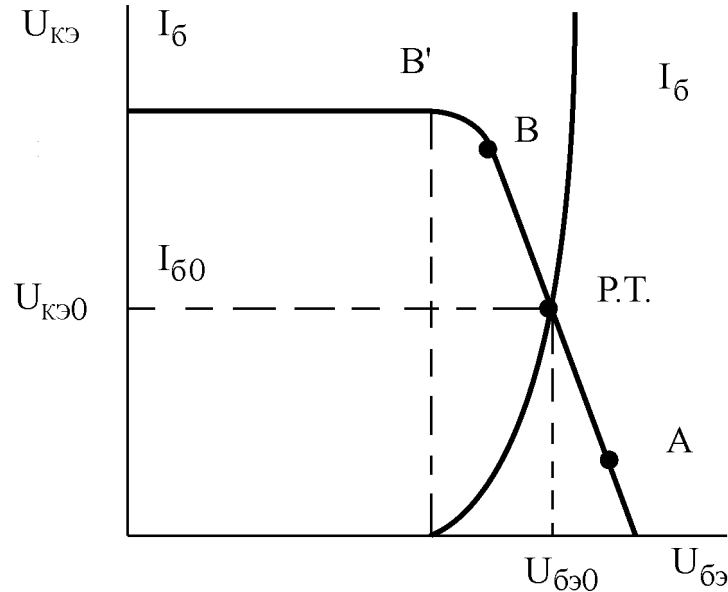


Рис. 5.5 Характеристика $U_{KЭ} = f(U_{БЭ})$

Следует отметить, что поскольку параметры транзисторов сильно зависят от температуры, положение рабочей точки (Р.Т.) может сильно колебаться при изменениях температуры. Поэтому в реальных схемах усилителей должна быть предусмотрена температурная стабилизация положения рабочей точки.

2.1.4. Усилители напряжения с общим эмиттером (Усилительный каскад с коллекторной нагрузкой)

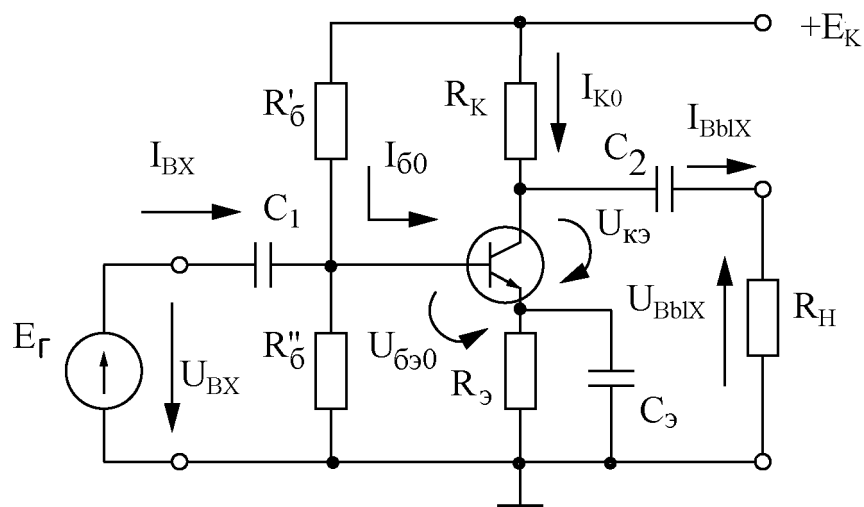


Рис.5.6. Схема усилительного каскада с коллекторной нагрузкой

Одним из наиболее распространенных усилительных каскадов на биполярных транзисторах является каскад с коллекторной нагрузкой. Транзистор в этом усилительном каскаде соединен по схеме с общим эмиттером, поэтому этот каскад часто называют усилительным каскадом с общим эмиттером (УОЭ), нагрузочный резистор R_K включен в коллекторную цепь транзистора. Полярность источника питания с ЭДС E_K по отношению к коллекторной цепи зависит от типа транзистора. На рис.5.6 полярность источника питания соответствует транзистору типа n-p-n.

Усилитель (рис.5.6) включает в себя все элементы структурной схемы (рис.2.1): основными элементами усилителя являются источник питания E_K , усилительный элемент в виде n-p-n транзистора T и коллекторное сопротивление R_K ; входную цепь с источником сигнала E_G и выходную – с нагрузочным устройством R_H . Резисторы R_6 ($R_6' // R_6''$) и R_K задают режим работы усилительного элемента T по **постоянному току**. Разделительные конденсаторы C_1 и C_2 исключают протекание постоянного тока от E_G и R_H к транзистору, тем самым обеспечивают независимый режим работы по постоянному току усилительного элемента и защищают транзистор от перегрузок в случаях аварийной работы E_G и R_H .

Принцип работы УОЭ (рис.5.6).

Пусть входной сигнал отсутствует $u_{BX}=0$. Через элементы усилителя протекает постоянный ток: $I_{б0}$ - ток покоя базовой цепи транзистора, $I_{к0}$ - ток покоя коллекторной цепи транзистора, вызывающий между электродами транзистора падение напряжения покоя $U_{бэ0}$ и $U_{кэ0}$. Важно правильно

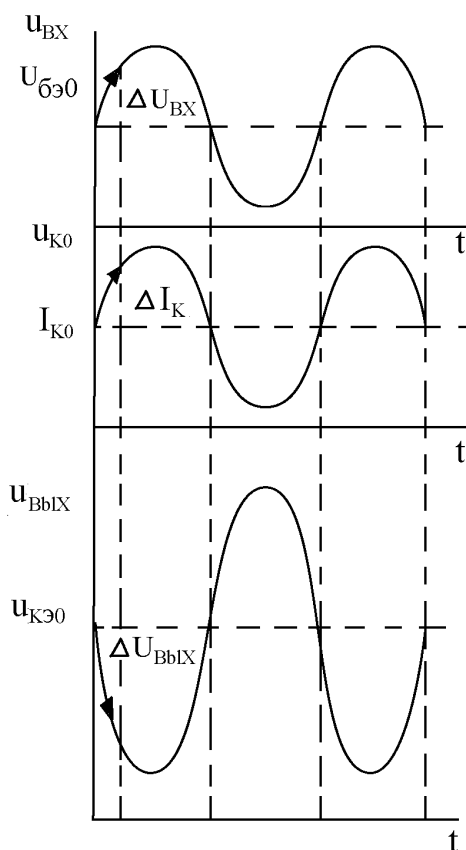


Рис.5.7. Временная диаграмма изменений токов и напряжений в усилительном каскаде

обеспечить режим работы усилителя по постоянному току, т.е. Р.Т. ($I_{\text{б}0}$, $I_{\text{к}0}$, $U_{\text{кэ}0}$, $U_{\text{бэ}0}$), так чтоб усилитель функционировал на линейном участке амплитудной характеристики. Это обеспечивается выбором $R_{\text{к}}$ и $R_{\text{б}}$. На практике $R_{\text{к}}$ выбирают равным (1÷10) кОм. $R_{\text{б}}$ согласно закона Кирхгофа

$$\text{можно определить } R_{\text{б}} = \frac{E_{\text{к}} - U_{\text{бэ}0}}{I_{\text{б}0}}.$$

Номинальные значения $I_{\text{б}0}$, $I_{\text{к}0}$, $U_{\text{кэ}0}$, $U_{\text{бэ}0}$ выбирают по входным и выходным характеристикам транзисторов, которые приводятся в справочниках, или по переходным характеристикам (рис.5.5).

В соответствии с зависимостью $U_{\text{кэ}}=f(U_{\text{бэ}})$ на рис.5.5 напряжение $U_{\text{кэ}}$ начинает уменьшаться(точка В') при увеличении напряжения $U_{\text{бэ}}$, с того значения, когда начинает расти ток $I_{\text{б}}$ ($I_{\text{б}}=f(U_{\text{бэ}})$). Объясняется это тем, что увеличение $I_{\text{б}}$ вызывает рост тока $I_{\text{к}}$ через транзистор. Следовательно, увеличивается напряжение на резисторе $R_{\text{к}}$ по закону Ома и в соответствии со 2-м законом Кирхгофа уменьшается напряжение на коллекторе транзистора $U_{\text{кэ}}$:

$$U_{\text{кэ}} = E_{\text{к}} - I_{\text{к}} R_{\text{к}}$$

(участок ВА характеристики рис. 5.5). Этот линейный участок является рабочим и определяет интервал колебаний переменных напряжений на входе и выходе усилителя относительно постоянных значений $U_{\text{кэ}0}$ и $U_{\text{бэ}0}$. Таким образом, эти значения $U_{\text{бэ}0}$ и $U_{\text{кэ}0}$ лежат в середине линейного участка, они обозначены Р.Т., т.е. это рабочая точка усилителя. По статической характеристике $I_{\text{б}}=f(U_{\text{бэ}})$ определяется ток покоя базы $I_{\text{б}0}$, ему соответствует ток покоя коллектора $I_{\text{к}0}=\beta I_{\text{б}0}$. Совокупность значений $I_{\text{б}0}$, $I_{\text{к}0}$, $U_{\text{кэ}0}$, $U_{\text{бэ}0}$ транзистора задаёт режим покоя. Накладывая на указанные постоянные составляющие переменные составляющие от входного сигнала в пределах участка АВ, получим колебания напряжений на электродах транзистора, соответствующие линейному режиму.

Работа усилительного каскада может быть пояснена с помощью рис.5.7. Пусть напряжение на входе усилителя **возрастает** на величину $\Delta U_{\text{вх}}$, это приведет к увеличению напряжения $\Delta U_{\text{бэ}}$, входного базового тока $I_{\text{б}}$ и тока коллектора транзистора $I_{\text{к}} = \beta \cdot I_{\text{б}}$. Сопротивление коллектор-эмиттерного перехода транзистора падает и, согласно закона Ома, уменьшается напряжение $U_{\text{кэ}}=U_{\text{вых}}$. Сказанное можно записать с помощью условной диаграммы: $\Delta U_{\text{вх}} \uparrow \rightarrow \Delta U_{\text{бэ}} \uparrow \rightarrow \Delta I_{\text{б}} \uparrow \rightarrow \Delta I_{\text{к}} \uparrow \rightarrow \Delta U_{\text{кэ}} \downarrow \rightarrow \Delta U_{\text{вых}} \downarrow$ (где знак \uparrow - величина возрастает, \downarrow - величина уменьшается). Если входное напряжение будет изменяться по синусоидальному закону $u_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} \sin \omega t$, то выходное напряжение также имеет синусоидальную форму $u_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} \sin(\omega t + 180^\circ)$ (это хорошо иллюстрирует временная диаграмма работы усилителя (рис.2.7)). Следует заметить, что усилитель меняет фазу сигнала на 180° (см. рис. 5.7), это означает, что УОЭ является инвертирующим.

Благодаря тому, что ток коллектора во много раз превышает ток базы ($\beta=20\div200$), а сопротивление $R_{\text{к}}$ больше $R_{\text{вх}}$, выходное напряжение

усилительного каскада с коллекторной нагрузкой получается во много раз больше входного напряжения, а коэффициент усиления по напряжению УОЭ составляет $K_u = 10 \div 100$.

Для **температурной стабилизации** усилительного каскада, т.е. фиксации положения рабочей точки на линейном участке характеристики, в цепь эмиттера включают резистор R_3 , шунтированный конденсатором C_3 (рис.5.6). Повышение температуры окружающей среды приводит к увеличению токов транзистора I_{B0} и I_{K0} ($I_{K0} \approx I_{Э0}$) и изменению положения РТ (рис.5.5). Режим работы по постоянному току входной цепи УОЭ $R_6'' - T - R_3$ (рис.5.6)

определяется по 2-му закону Кирхгофа $U_{БЭ0} = \frac{E_K R_6''}{R_6'' + R_6'} - R_3 I_{Э0}$, поэтому

увеличение $I_{Э0}$, согласно этому уравнению, приводит к уменьшению $U_{БЭ0}$, т.к. первое слагаемое уравнения постоянно и не зависит от T °С. Уменьшение $U_{БЭ0}$ закрывает транзистор Т и уменьшает I_{B0} до прежней величины. Сказанное отражается с помощью условной диаграммы:

$$\Delta T^{\circ}C \uparrow \rightarrow I_{B0} \uparrow \rightarrow I_{K0} \approx I_{Э0} \uparrow \rightarrow U_{БЭ0} \downarrow \rightarrow U_{B0} \downarrow$$

Однако включение резистора R_3 уменьшает K_u усилителя, т. к. часть полезного (усиливаемого сигнала) $u_{вх}$ выделяется на нем и не усиливается транзистором (уравнение для входной цепи усилителя по переменному току запишется $u_{БЭ} = u_{вх} - R_3 i_3$). Чтобы этого избежать резистор R_3 шунтируется конденсатором C_3 , емкость которого выбирается таким образом, чтобы для всех частот усиливаемого переменного сигнала его сопротивление было много меньше R_3 , тогда переменная составляющая тока эмиттера проходит через конденсатор C_3 , почти не вызывая падения напряжения на резисторе R_3 . В результате падение напряжения на резисторе R_3 от постоянной составляющей тока практически не меняется, а, следовательно, переменное напряжение на входе каскада оказывается равным переменному напряжению между базой и эмиттером $u_{вх} \approx u_{БЭ}$, т.е. усиливаемое напряжение не меняется за счет цепочки $R_3 C_3$ (стабильно при изменении температуры).

Приведенная схема усилительного каскада хорошо стабилизирована в диапазоне температур от $-60^{\circ}C$ до $+60^{\circ}C$, при этом значение сопротивления R_3 выбирают наименьшим по величине (обычно $R_3 \approx (10 \div 100)$ Ом), чтобы обеспечить минимальные энергетические потери.

Характеристики УОЭ:

Входное сопротивление $R_{вх} = h_{11} = n \cdot 100 \text{ Ом}$ ($n=1,2,\dots$); выходное сопротивление $R_{вых} \approx R_K = n \cdot (1-10) \text{ кОм}$; коэффициент усиления по напряжению $K_u \approx \beta R_K / R_{вх} \approx 10-200$; $C_3 = \frac{10 \div 20}{2\pi f R_3}$.

Анализ работы усилительного каскада проводится по статическим входным и выходным характеристикам транзистора **графоаналитическим методом**. Для коллекторной цепи усилительного каскада (рис.5.6) в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать следующее уравнение электрического состояния:

На выходных статических характеристиках биполярного транзистора строится линия нагрузки, т.е. вольтамперная характеристика коллекторного резистора R_k , получаемая из предыдущего выражения (рис. 2.8а).

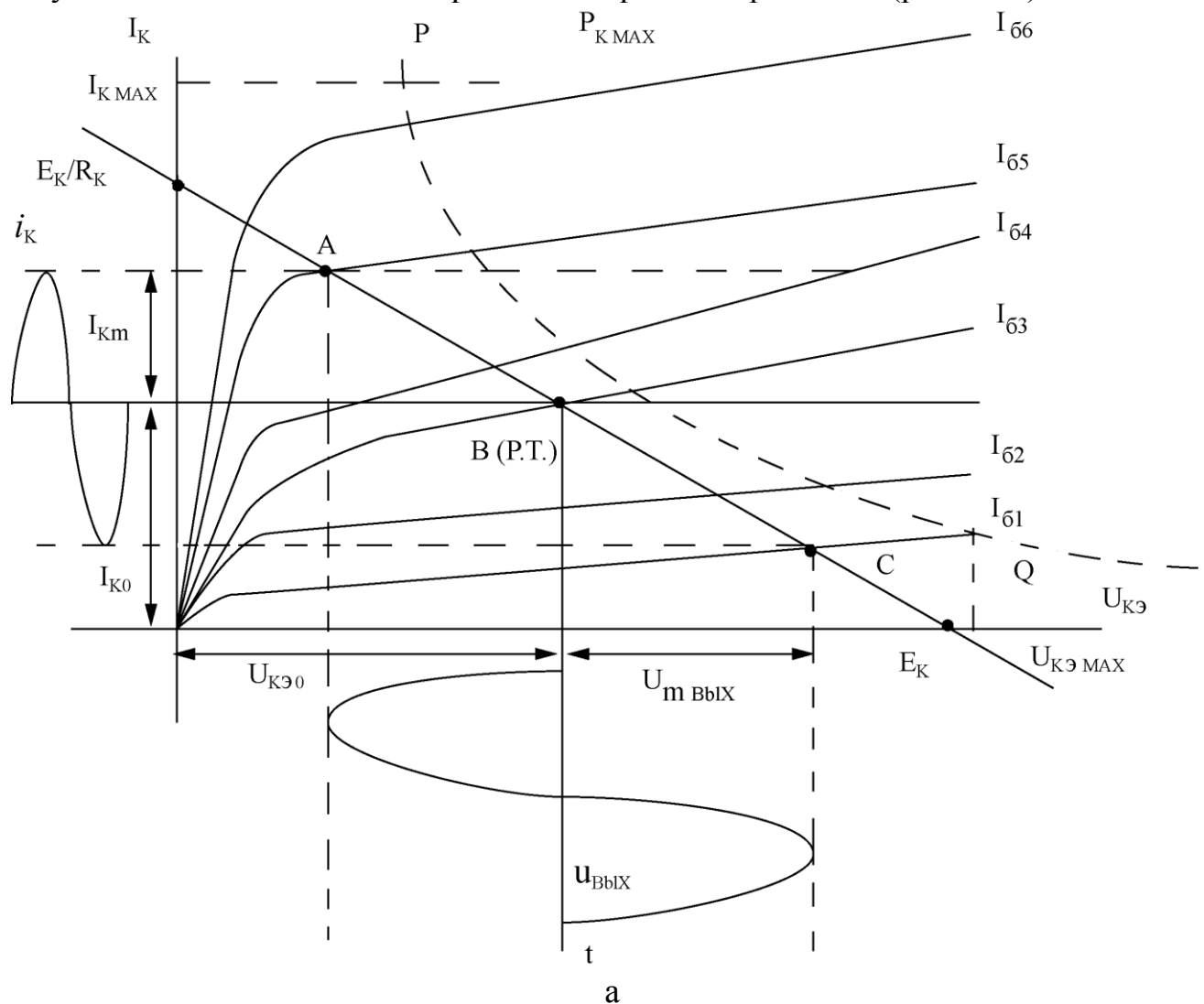
Эту прямую строят по двум точкам, в которых она пересекает оси:

ось ординат в точке $I_K = E_K/R_K$ при $U_K = 0$.

$$\operatorname{tg} \alpha = m_i / R_K^* m_u,$$

где α - угол наклона линии нагрузки к оси абсцисс, m_i и m_u – масштабные коэффициенты для тока и напряжения. Значения токов i_k , i_b , напряжений на коллекторе u_k и на резисторе u_{Rk} определяются точкой пересечения линии нагрузки с соответствующей выходной характеристикой, причем эта точка при пульсациях входного напряжения перемещается вдоль линии нагрузки.

В режиме покоя ($U_{BX} = 0$) положение рабочей точки выбирается в середине рабочей области характеристик, ограниченной гиперболой RQ допустимой мощности, рассеиваемой транзистором, а также максимально допустимыми током $I_{K\text{ MAX}}$ и напряжением транзистора $U_{KЭ\text{ max}}$ (рис. 5.8а).



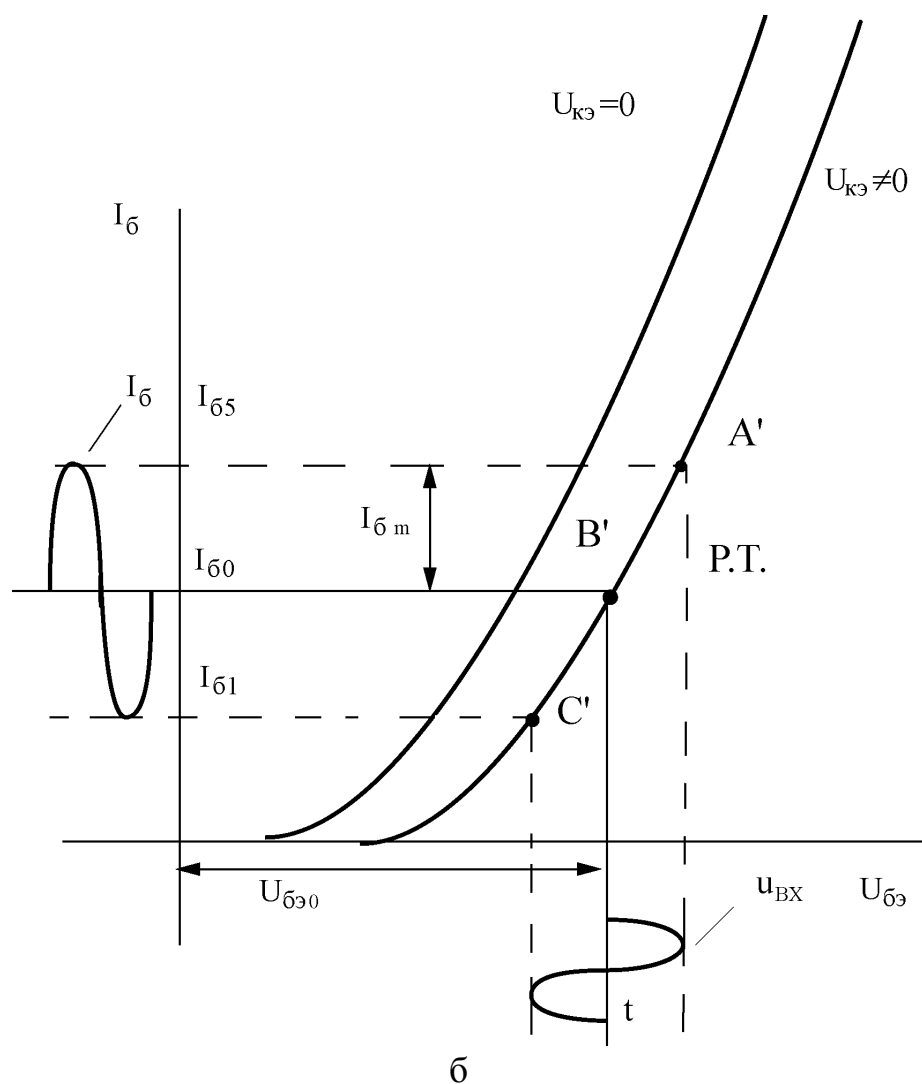


Рис. 5.8 . Определение рабочего режима усилителя с помощью входных (а) и выходных (б) статических характеристик транзистора

Такое положение рабочей точки В на линии нагрузки, когда отрезки АВ и ВС равны, обусловлено стремлением получить высокую степень линейности режима усиления при минимальном потреблении мощности каскадом в режиме покоя. Снизу участок линейного усиления на линии нагрузки ограничен минимально допустимым током коллектора (точка С), соответствующий ему минимальный ток базы (точка С' на рис. 5.8б) определяется началом линейного участка входной характеристики. Все входные характеристики транзистора располагаются достаточно близко, поэтому в качестве динамической входной характеристики используется положение средней при $U_{кэ} \neq 0$ (например, при $U_{кэ} = 5$ В). Точка А на линии нагрузки соответствует уменьшению коэффициента передачи по току β транзистора при больших величинах тока I_k (т.е. нарушению линейности).

Точке А на выходных характеристиках соответствует точка А' на входных характеристиках транзистора, определяющая максимальный ток базы. Точка В' (рабочая точка РТ) соответствует значению тока покоя базы $I_{б0}$.

По положению рабочей точки определяются параметры режима покоя ($I_{б0}$, $I_{к0}$, $U_{кэ0}$, $U_{бэ0}$), а рабочий участок характеристик (АС и А'С') позволяет

определить амплитуды переменных составляющих токов базы i_b , коллектора i_k , напряжений $u_{бэ}=u_{вх}$ и $u_{кэ}=u_{вых}$, и вычислить коэффициенты усиления каскада.

Описанный режим работы усилителя соответствует классу **A**. В зависимости от положения рабочей точки покоя на динамической характеристике различают режимы работы транзистора в схеме – классы **A**, **B**, **AB** и **C**.

При работе в режиме класса **A** рабочая точка покоя выбирается посередине. Этот режим обеспечивает минимальные нелинейные искажения, но к.п.д. каскада мал (не превышает 50%).

С целью повышения к.п.д. усилителя используются классы усиления **B**, **AB** и **C**, однако в этих классах велики нелинейные искажения сигнала.

В классе **B** напряжение смещения $U_{бэ0}$ равно нулю и точка покоя располагается в нижнем конце линии нагрузки.

Класс **AB** – промежуточный между классами **A** и **B**.

В классе **C** точка покоя выбирается в области отсечки и при отсутствии входного сигнала транзистор заперт.

2.1.5. Эмиттерный повторитель

Малое $R_{вх}$ и высокое $R_{вых}$ сопротивления является недостатком УОЭ, не позволяющим к его входу подключать высокоомных источник входного сигнала и низкоомное нагрузочное устройство (например, акустический динамик, обмотку двигателя и т.д.). Этих недостатков лишен **эмиттерный повторитель** (см. рис. 5.9). Назначение элементов $R_б$, C_1 , C_2 , E_k тоже, что и УОЭ.

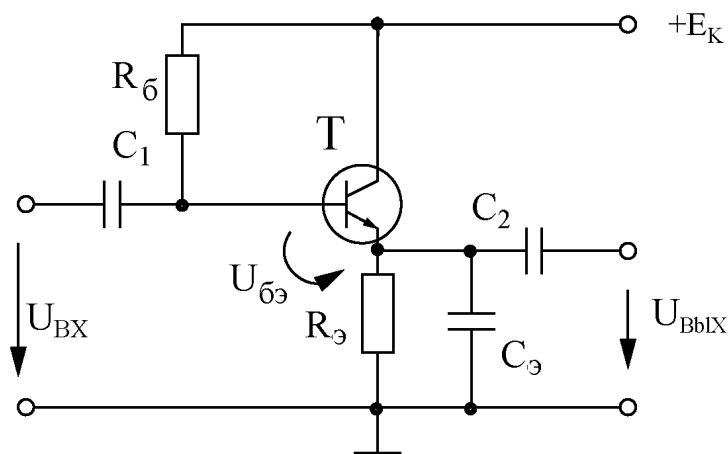


Рис. 5.9. Схема эмиттерного повторителя

Нагрузочный резистор $R_э$ включается в цепь эмиттера биполярного транзистора, поэтому эта схема является усилителем с эмиттерной нагрузкой. Коллектор по переменной составляющей тока и напряжения соединен непосредственно с общей точкой усилителя, так как падение напряжения от переменной составляющей тока на внутреннем сопротивлении источника

коллекторного напряжения E_k незначительно. Поэтому этот каскад является усилителем с общим коллектором (ОК). Таким образом, можно считать, что входное напряжение подается между базой и коллектором через разделительный конденсатор C_1 , а выходное напряжение, равное падению напряжения на резисторе $U_{вх}$ от переменной составляющей эмиттерного тока, снимается между эмиттером и коллектором через конденсатор C_2 .

В режиме покоя, т.е. при $U_{вх}=0$ начальный ток смещения в цепи базы $I_{б0}$ задается резистором $R_б$. Эту величину выбирают такой, чтобы рабочая точка усилительного каскада находилась примерно посередине линейного участка входной характеристики.

При наличии переменного напряжения на входе $U_{вх}$ появляется переменная составляющая эмиттерного тока $i_э$, совпадающая по фазе со входным сигналом. На резисторе $R_э$ выходное напряжение $u_{вых} = R_э i_э$ также совпадает по фазе с током $i_э$ и следовательно, со входным сигналом (сдвиг по фазе между входным и выходным напряжением равен 0). Для входной цепи по переменному току выполняется 2-й закон Кирхгофа $u_{вх} = u_{бэ} + u_{вых}$. Так как $u_{бэ} \ll u_{вых}$, то $u_{вх} \approx u_{вых}$. Таким образом на вход транзистора между базой и эмиттером подаётся переменное напряжение, равное разности входного и выходного сигналов, т.е. усиливаемое напряжение весьма мало. Это так называемая отрицательная обратная связь по напряжению, приводящая к тому, что коэффициент усиления этого каскада по напряжению близок к единице:

$$K_u = (0,8 \div 0,95).$$

Так как выходное напряжение этого усилительного каскада мало отличается от входного по величине и фазе, этот каскад называют эмиттерным повторителем.

Входное сопротивление эмиттерного повторителя составляет величину

$$R_{вх} \approx \frac{h_{11}}{1 - K_u} \approx (100 \div 1000) \text{ кОм},$$

а выходное сопротивление - $R_{вых} = \frac{h_{11}}{1 + \beta} \approx (10 \div 100) \text{ Ом}$. Таким образом

эмиттерный повторитель обладает большим входным и малым выходным сопротивлением, следовательно, его коэффициент усиления по току может быть очень высоким, т.е. это усилитель тока ($K_i = h_{21} = \beta$).

Температурная стабилизация в эмиттерном повторителе обеспечивается цепочкой $R_э C_э$, схема повторителя отличается высокой температурной стабильностью, а также малыми частотными искажениями.

Эмиттерный повторитель включают между источником сигнала $E_Г$ и УОЭ, УОЭ и нагрузочным устройством $R_Н$ для **согласования** сопротивлений этих устройств по величине и исключения их **шунтирования** друг друга.

Усилительный каскад на полевом транзисторе

Большое распространение получили усилительные каскады на полевых транзисторах, так как они обладают значительно **большим** входным сопротивлением по сравнению с усилительными каскадами на биполярных транзисторах. Малый входной ток, за счет высокого входного сопротивления полевого транзистора, позволяет обеспечить высокое отношение полезного сигнала к собственному шуму и конструировать высокочувствительные усилители (до $0,01 \div 0,1 \text{ мВ}$) в измерительной технике. Наиболее часто используется каскад с общим истоком, схема которого приведена на рис.2.10.

Полярность источника питания определяется типом применяемого полевого транзистора. В транзисторе с n-каналом напряжение E_C положительно.

В цепь стока включен нагрузочный резистор R_C , обеспечивающий динамический режим работы усилителя. На транзисторе R_C выделяется усиленное переменное напряжение.

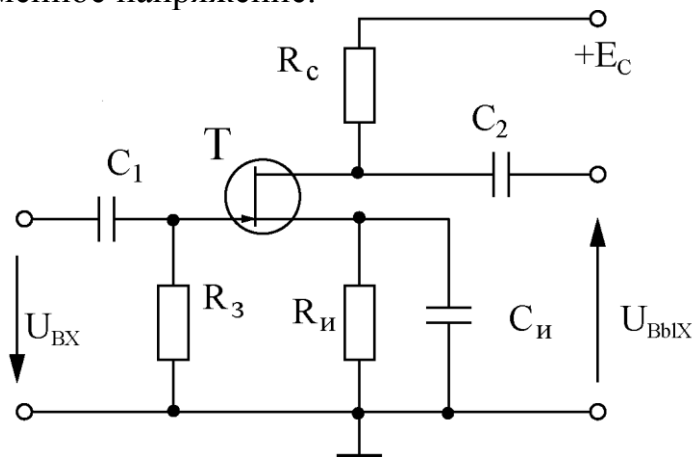


Рис. 5.10. Схема усилительного каскада с общим истоком

В цепи истока резистор $R_{и}$ создает необходимое смещение между затвором и истоком. При этом потенциал затвора оказывается ниже потенциала истока на величину падения напряжения на резисторе $R_{и}$ от тока покоя истока $I_{и0}$ ток покоя в цепи затвора равен нулю.

Входное напряжение подается на резистор R_3 через разделительный конденсатор C_1 . При этом в канале полевого транзистора появляются переменные составляющие тока истока $i_{и}$ и тока стока i_c , причем $i_{и} \approx i_c$. Для того, чтобы переменная составляющая тока истока не создавала падение напряжения на резисторе $R_{и}$ и не уменьшала за счет этого величину усиливаемого сигнала между затвором и истоком по сравнению со входным напряжением, резистор $R_{и}$ шунтируется конденсатором $C_{и}$. Сопротивление конденсатора на самой низкой частоте усиливаемого напряжения должно быть во много раз меньше сопротивления резистора. При этом условии падение напряжения от тока истока $i_{и}$ на цепочке $R_{и}C_{и}$, называемой звеном автоматического смещения, имеет очень небольшую величину, так что по

переменной составляющей тока исток можно считать соединенным с общей точкой усилительного каскада.

Выходное напряжение снимается через разделительный конденсатор C_2 между стоком и общей точкой каскада, т.е. оно равно переменной составляющей напряжения между стоком и истоком.

Рассматриваемый усилительный каскад является усилителем напряжения. Величина коэффициента усиления каскада составляет:

$$K_u = 10 \div 100.$$

Входное сопротивление полевых транзисторов, т.е. сопротивление между затвором и истоком, имеет величину порядка 10^7 Ом, поэтому входное сопротивление усилителя определяется сопротивлением резистора R_3 , который подключен параллельно входным зажимам полевого транзистора:

$$R_{вх} \approx R_3 = 10^5 \div 10^6 \text{ Ом.}$$

Выходное сопротивление современных полевых транзисторов (сопротивление между стоком и истоком) имеет величину порядка 10^5 Ом, поэтому выходное сопротивление усилительного каскада на полевом транзисторе определяется сопротивлением резистора R_C :

$$R_{вых} \approx R_C = 10^3 \div 10^4 \text{ Ом.}$$

Таким образом у этого усилителя $R_{вых} \ll R_{вх}$, что является важным преимуществом усилительного каскада на полевых транзисторах.

Анализ работы усилительного каскада на полевом транзисторе с общим истоком может быть проведен графоаналитическим методом аналогично усилителю на биполярном транзисторе с общим эмиттером.

Истоковый повторитель

Усилительный каскад, аналогичный эмиттерному повторителю может быть построен на полевом транзисторе, называется каскад истоковым повторителем. Схема его приведена на рис.2.11.

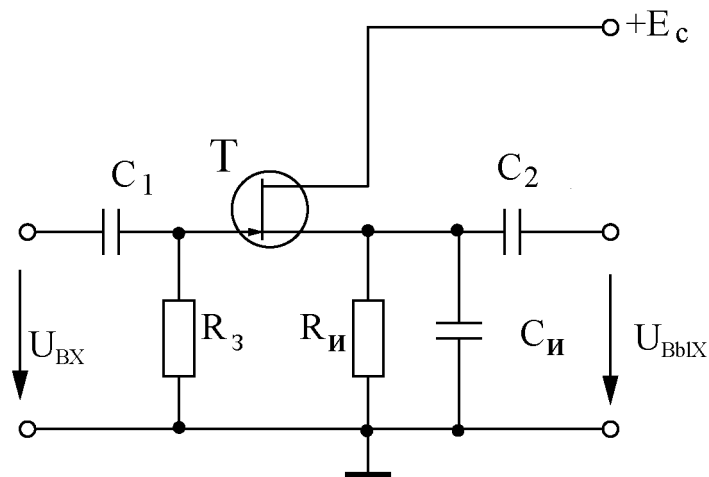


Рис.5.11. Истоковый повторитель

В этом каскаде сток по переменной составляющей соединен с общей точкой усилителя, нагрузочный резистор $R_{и}$ включен в цепь истока.

Свойства этого каскада аналогичны свойствам эмиттерного повторителя: он имеет высокое входное сопротивление до 10 МОм и выше, низкое выходное сопротивление менее 1 кОм, коэффициент передачи напряжения $K_u \approx 1$, фаза выходного напряжения практически равна фазе входного напряжения. Коэффициент усиления по току K_i истокового повторителя значительно больше, чем у эмиттерного повторителя, K_i достигает до величины от нескольких десятков тысяч до миллиона.

Истоковые повторители, так же как и эмиттерные повторители, чаще всего применяют в качестве вспомогательных усилительных каскадов для согласования высокоомных источников усиливаемого напряжения с низкоомными нагрузочными устройствами.